

· 试验研究 ·

宽规格板坯连铸结晶器浸入式水口的数值模拟

舒宏富^{1,2} 刘 浏¹ 刘学华²

(1 钢铁研究总院工艺所,北京 100081; 2 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心,马鞍山 243000)

摘 要 利用 Fluent 计算软件建立三维数学模型对马钢板坯连铸结晶器内钢液的流场和温度场进行数值模拟研究,并进行正交试验,分析了水口浸入深度(150~190 mm)、水口侧孔倾角(-10°~-16°)、水口侧孔与中孔的截面积比值(2.2~3.2)对拉速0.9 m/s,230 mm×1 800 mm 结晶器内钢液流动的影响。研究表明,水口浸入深度和倾角对结晶器液面波动 F 数和凝固坯壳厚度的影响较为显著。对于浇铸断面 230 mm×1 800 mm 的结晶器浸入式水口的最佳工艺参数为:浸入深度 170 mm、水口侧孔倾角 13°、侧孔出口与中孔面积比 2.7。

关键词 板坯连铸 结晶器浸入式水口 流场 温度场 数值模拟

Numerical Simulation on Submerged Nozzle in Mold of Continuous Caster for Wider Slab

Shu Hongfu^{1,2}, Liu Liu¹ and Liu Xuehua²

(1 Institute for Metallurgical Technology, Central Iron and steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Technology Centre, Ma' anshan Iron and Steel Co Ltd, Ma' anshan 243000)

Abstract The numerical simulation of flow field and temperature field in casting mold for wide slab at Ma' anshan Steel has been carried out by established a three-dimensional model using Fluent software, and the effect of immersion depth of nozzle (150~190 mm), angle of side hole of nozzle (-10°~-16°), ratio of cross-section area of side-hole to inside-hole (2.2~3.2) on liquid flow in 230 mm×1 800 mm mold with casting rate 0.9 m/s is analyzed by orthogonal experiment method. Study results show that the influence of immersion depth of nozzle and side angle on mold liquid surface wave F number and thickness of solidified shell is significant. The optimum technology parameters of submerged nozzle for casting 230 mm×1 800 mm slab are submerged depth of nozzle 170 mm, angle of nozzle side-hole 13° and ratio of cross-sectional area of side-hole to inside-hole 2.7.

Material Index Slab Casting, Submerged Nozzle for Mold, Flow Field, Temperature Field, Numerical Simulation

结晶器内钢液的流场和温度场是影响钢液凝固行为的主要因素^[1-2],而水口结构参数又是直接影响结晶器内钢液的流场和温度场关键因素之一。马钢第四轧总厂 2[#]板坯连铸机结晶器宽度为 950~2 150 mm,却只采用一种规格的水口。当浇铸宽度 1 800 mm 以下铸坯时,连铸过程比较平稳,铸坯质量也比较正常,然而,在浇铸 1 800 mm 以上规格时,结晶器液面波动较大,甚至出现严重卷渣,尽管调整了拉速和水口浸入深度,也未能解决相应问题,因此,有必要对宽规格结晶器的浸入式水口进行优化设计。为此,利用 Fluent 软件建立三维数学模型对板坯连铸结晶器内钢液的流场和温度场进行数值模拟研究,并进行正交试验,分析水口浸入深度、侧孔倾角、侧孔与中孔的截面积比值等因素对凝固坯壳厚度、下涡心高度、弯月面温度、液面波动的 F 数以及液面最大速度等的影响关系,为宽规格结晶器的浸入式水口优化设计提供依据。

1 数学模型的建立

1.1 模型基本假设

模型的假设如下:(1)传输过程为稳态,钢液为不可压缩的牛顿流体;(2)忽略凝固过程中钢的密度变化,钢液的热物理参数为常数;(3)铸坯外弧和内弧的传热条件对称;(4)不考虑机械变形引起的流动和铸坯凝固收缩引起的流动;(5)将含自由面(结晶器液面)的开口系统作为封闭系统来模拟,且视自由面为光滑壁面;(6)忽略结晶器锥度的影响。

1.2 模型基本方程

在直角坐标系下,描述结晶器内钢液流动和传热可用连续性方程、动量守恒方程、能量方程以及湍流模型来描述,即

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: T - 绝对温度; Γ_{eff} - 有效温度扩散系数, 可由下

$$\text{式确定: } \Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (4)$$

式中: Pr, Pr_t - 层流和湍流的普朗特数; S_T - 源项, 无内热源时其值为 0。

湍动能 k 方程:

$$\rho \frac{\partial(u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_{\text{eff}} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍动能耗散率 ε 方程:

$$\rho \frac{\partial(u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_{\text{eff}} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (6)$$

$$G = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中: $u_i (i=1, 2, 3)$ - 分别为坐标轴 x, y, z 方向上的速度; 上述方程中出现的系数按 Launder 和 Spalding 的推荐值^[3]。

1.3 模型边界条件

$$(1) \text{ 入口速度。 } \nu_0 = \frac{\nu_{\text{cast}} \times S_p}{S} \quad (9)$$

式中: ν_0 - 钢液流速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); ν_{cast} - 拉速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); S_p - 铸坯横截面积/ m^2 ; S - 水口面积/ m^2 。

(2) 入口的 k_i, ε_i 初值。由下式确定:

$$k_i = 0.01 \bar{\nu}_0^2 \quad \varepsilon_i = k_i^{3/2} / (d_0/2) \quad (10)$$

式中: $\bar{\nu}_0$ - 入口平均流速; d_0 - 水口当量直径。

(3) 入口处的温度设为浇铸温度。

(4) 对称面。除垂直对称面的速度分量设为 0 外, 其它物理量沿对称面的法线方向的梯度为 0。

(5) 自由表面。除垂直于钢液表面的速度分量设为 0 外, 其它变量沿自由表面法线方向的梯度为 0。

(6) 固体壁面。采用 Launder 和 Spalding^[3] 提出的单层壁面函数, 即考虑层流层和湍流核心层的划分, 并假设黏性层以外的区域, 无量纲速度服从对数定律。

(7) 出口边界条件: 按坐标局部单向化的要求, 取出口法线正方向上所有变量的梯度为 0。计算区域出口处所有变量的垂直梯度设为 0。

1.4 模型求解方法

因连铸结晶器结构的对称性, 故只需模拟计算结晶器内腔的 1/4 区域。为使结晶器内钢液流动充分发展, 减少结晶器下方的流场对结晶器内流场的影响, 将计算区域在结晶器有效长度的基础上延伸到二冷区域, 计算区域总长为 2.7 m。按照网格疏密适度、过渡均匀的原则, 采用六面体结构化网格对计算域进行网格划分。采用控制体积法 (Control Volume Method, CVM) 将计算域离散为互不重叠的计算网格。采用 SIMPLE 算法进行差分方程的求解。计算区域边界类型见图 1(a), 结晶器网格划分见图 1(b)。

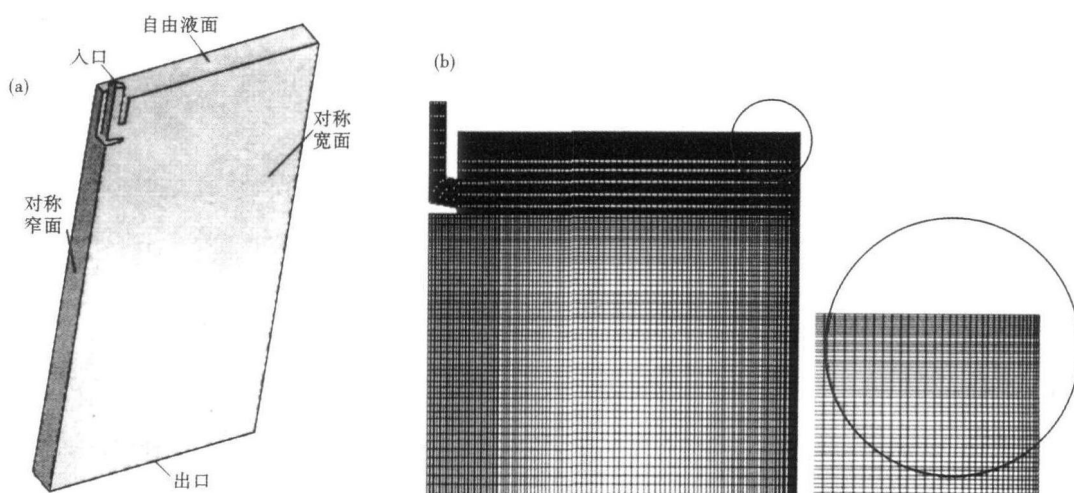


图 1 (a) 计算区域及边界类型; (b) 计算域对称面上的网格
Fig. 1 (a) Calculation area and boundary type; (b) Calculation mesh domain on symmetry surface

2 研究方案和数值模拟结果

本研究的对象为马钢第四钢轧总厂2*连铸机,其基本参数如表1所示。计算断面为230 mm × 1 800 mm,拉速为0.9 m/min。

表1 连铸机和结晶器的主要参数
Table 1 Main parameter of caster and mold

2机2流直弧形连铸机		铸坯规格		结晶器		水口浸入深度/mm
冶金长度/mm	弧开半径/mm	厚度/mm	宽度/mm	长度/mm	锥度/(%·m ⁻¹)	
33 249	9 590	230, 250	950 ~ 2 150	900	0.90	150 ~ 250

通常,考察结晶器内钢液的流场和温度场的主要评价指标有:凝固坯壳厚度、下涡心高度、液面最大速度以及液面波动的 F 数。考察的影响因素主要有:水口浸入深度、水口侧孔倾角、侧孔与中孔面积比。本文按 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验设计^[4],用极差分析法和方差分析对数值模拟计算结果进行分析,得出各因素的最佳水平组合。正交试验方案的因素水平如表2所示。

表2 正交试验方案的因素水平
Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment scheme

水平	A 浸入深度/mm	B 侧孔倾角/°	C $S_{侧}/S_{中}$
1	150	-10	2.2
2	170	-13	2.7
3	190	-16	3.2

根据表2的正交试验方案进行数值模拟计算,计算结果列于表3中。

3 结果分析与讨论

3.1 各因素对液面波动 F 数、凝固坯壳厚度等指标影响显著性检验

表3 各试验方案的试验计算结果
Table 3 Calculation results of each experiment scheme

试验号	试验条件			试验计算结果				
	浸入深度/mm	侧孔倾角/°	$S_{侧}/S_{中}$	坯壳厚度/mm	液面最大速度/(m·s ⁻¹)	下涡心高度/m	弯月面处温度/K	液面波动的 F 数
1	150	-10	2.2	17.9	0.39	-0.48	1 790.89	4.72
2	150	-13	2.7	16.12	0.35	-0.65	1 791.07	4.60
3	150	-16	3.2	14.78	0.33	-0.63	1 791.34	4.19
4	170	-10	2.7	16.2	0.34	-0.56	1 791.01	2.74
5	170	-13	3.2	12.2	0.26	-0.68	1 791.05	2.97
6	170	-16	2.2	13.2	0.32	-0.59	1 791.15	2.43
7	190	-10	3.2	12.2	0.24	-0.67	1 790.98	2.50
8	190	-13	2.2	11.77	0.31	-0.58	1 791.08	2.70
9	190	-16	2.7	12.52	0.25	-0.66	1 790.97	2.04

采用方差分析法对表3的试验结果进行显著性分析,得出各影响因素的 F 值见表4。

表4 正交试验方差分析 F 值
Table 4 Orthogonal experiment variance analysis F value

因素	方差分析 显著性检验 F 值		$F_{0.01}(2,2) = 99, F_{0.05}(2,2) = 19.0$		
	液面波动 F 值	坯壳厚度	液面最大速度	下涡心高度	弯月面处温度
A	1 149.3	83.8	9.6	1.1	0.3
B	73.0	26.4	0.7	2.3	1.2
C	5.6	18.1	4.8	5.9	0.4
显著性	A**, B*, C不显著	A*, B*, C不显著	A, B, C均不显著		

由表4可知,在本研究条件下,各因素对结晶器液面波动 F 数、凝固坯壳厚度等指标影响的主次顺序是:浸入式水口浸入深度(因素A) >> 水口出口倾角(因素B) > 侧孔与中孔的面积比(因素C)。

3.2 各因素对液面最大速度和液面波动 F 数的影响

采用极差分析法对表3中的计算结果进行分析,得到各因素水平变化对液面最大速度和液面波动 F 数的影响。结果表明,水口浸入深度(因素A)对液面最大速度和液面波动 F 数的影响显著,液面最大速度和液面波动 F 数随浸入深度的增大而减小。这是因为随着浸入深度的增加,流股冲击到结晶器窄边后返回自由液面的距离增加,使得流速减小,对结晶器自由液面的扰动也随之减小。水口侧孔倾角(因素B)和侧孔与中孔的面积比(因素C)变化对液面最大速度和液面波动 F 数的影响较小。

文献[5]研究认为,要想获得较为理想的结晶器液面波动范围($\pm 3 \sim \pm 5$ mm),其对应液面速度应为0.28 ~ 0.36 m/s、液面波动 F 数应为3 ~ 5。因此,为得到理想的液面波动状态,本研究条件下的水口浸入深度应首先选择A2,侧孔倾角选择B1、B2,

侧孔与中孔的面积比选择C1、C2、C3均可,还需与其它考察指标的分析综合确定。

3.3 各因素对凝固坯壳厚度、下涡心高度和弯月面处温度的影响

采用极差分析法对表3中的计算结果进行分析,得到各因素水平变化对凝固坯壳厚度、下涡心高度和弯月面处温度的影响。结果表明,水口

浸入深度对凝固坯壳厚度的影响显著,水口侧孔倾角和侧孔与中孔的面积比次之;而因素 A、B、C 三者对下涡心高度和弯月面处温度的影响不显著。凝固坯壳厚度随浸入深度的增大而减小,主要是因为浸入深度的增加导致结晶器底部的热量增加,使得已经凝固的坯壳发生重熔而使坯壳厚度变薄。

在保证凝固坯壳厚度大于铸坯能够抵抗钢水静压力的临界坯壳厚度以免产生拉漏事故的基础上,

应同时使结晶器液面具有一定活跃性和较高的弯月面温度。因此,水口浸入深度应首先选择 A2,侧孔倾角选择 B1、B2,出口面积选择 C2。

3.4 浸入式水口的优化设计

综上所述,最佳浸入式水口的工艺参数组合为 A2、B1、C2 或 A2、B2、C2。为进一步确定水口侧孔倾角的最佳水平,固定 A2、C2 因素水平进行补充试验,结果如表 5 所示。

表 5 补充试验方案的计算结果

Table 5 Calculation results for supplementary experiment scheme

试验	浸入深度/ mm	侧孔倾角/ °	$S_{侧}/S_{中}$	坯壳厚度/ mm	液面最大速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	下涡心高 度/m	弯月面处 温度/°C	液面波动的 F 数
10	170	-10	2.7	16.90	0.40	-0.64	1790.86	2.89
11	170	-13	2.7	16.40	0.35	-0.51	1791.06	3.52

由表 5 知,对于浇铸断面 230 mm × 1 800 mm 的最佳水口设计方案为:浸入深度 170 mm、侧孔倾角 13°、侧孔与中孔面积比 2.7。

4 结论

(1) 水口浸入深度对结晶器液面波动 F 数的影响极为显著,随浸入深度的增大,结晶器液面波动 F 数减小。水口倾角对液面波动 F 数的影响较为显著。而侧孔与中孔的面积比变化对液面波动 F 数的影响较小。

(2) 水口浸入深度对凝固坯壳厚度的影响显著,水口倾角和侧孔与中孔的面积比次之。凝固坯壳厚度随浸入深度的增大而减小;水口侧孔倾角为 10° 时凝固坯壳厚度最大,倾角由 13° 变为 16° 时,凝固坯壳厚度基本不变。

(3) 对于浇铸断面 230 mm × 1 800 mm 的结晶器浸入式水口的最佳设计方案为:浸入深度 170 mm、水口侧孔倾角 13°、侧孔出口与中孔面积

比 2.7。

参考文献

- [1] 张乔英,王立涛.板坯连铸结晶器浸入式水口工艺参数的模拟正交试验[J].特殊钢,2004,25(4):9-12.
- [2] Teshima T, Kubota J, Suzuki M, et al. Influence of Casting Conditions on Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold at High Speed Casting of Slabs (in Japan). Iron Steel, 1993, 79(5):576-582.
- [3] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flow [J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 15(3):269-276.
- [4] 何少华,文竹青,娄涛.试验设计与数据处理[M].长沙:国防科技大学出版社,2002,67-75.
- [5] 陆巧彤,王新华,于会香,等. F 数计算及其与板坯连铸结晶器内钢水卷渣的关系[J].北京科技大学学报,2007,29(8):811-815.

舒宏富(1971-),男,博士研究生,高级工程师,1997年武汉科技大学毕业,洁净钢工艺技术和新产品开发。

E-mail:shf163ss@163.com

收稿日期:2012-07-11

下 期 要 目

- | | |
|--|------|
| Al, Ti, Nb, Mo 含量对新型 Ni-25Cr-20Co 镍基合金中 γ' 和 η 析出相的影响 | 郝文慧等 |
| 50 t 转炉氧枪喷头冷却水流的数值模拟和优化 | 孙玉霞等 |
| 45 钢中厚板矫直过程温度场有限元模拟及残余应力分析 | 刘 炼等 |
| 气体保护电渣重熔过程氧传递的动力学研究 | 史成斌等 |
| 高品质轴承钢超低氧含量和非金属夹杂物控制的进展 | 杨虎林等 |
| 气体旋流喂丝枪喂椭圆包芯线实现钢液内部喂丝钙处理 | 严清华等 |
| Assel 轧管机轧制薄壁 $\Phi 70$ mm × 3 mm 合金结构钢管工艺研究和辊型改进 | 袁方成等 |
| 组分含量对 CaO-MgO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 四元精炼渣系黏度的影响 | 张明博等 |
| 含锡易切削钢 SY12SnS 的工业试生产 | 张灏平等 |